

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて  
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed  
with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 3 年   7 月 3 1 日  
Date of Application:

出 願 番 号            特 願 2 0 0 3 - 2 8 3 5 9 3  
Application Number:

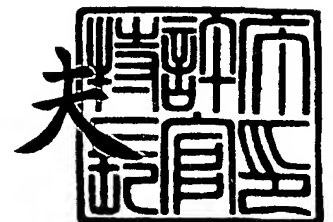
[ST. 10/C] :            [ J P 2 0 0 3 - 2 8 3 5 9 3 ]

願            人            T D K 株 式 会 社  
Applicant(s):

2 0 0 4 年   4 月   6 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今 井 康 夫



CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT

出証番号   出証特 2 0 0 4 - 3 0 2 8 0 8 7

【書類名】 特許願  
【整理番号】 99P05609  
【提出日】 平成15年 7月31日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 G01R 27/06  
【発明者】  
    【住所又は居所】 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 T D K株式会社内  
    【氏名】 江畑 克史  
【特許出願人】  
    【識別番号】 000003067  
    【氏名又は名称】 T D K株式会社  
    【代表者】 澤部 肇  
【代理人】  
    【識別番号】 100078031  
    【氏名又は名称】 大石 皓一  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100121681  
    【氏名又は名称】 緒方 和文  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100126468  
    【氏名又は名称】 田久保 泰夫  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 074148  
    【納付金額】 21,000円  
【その他】 平成 1 5 年 6 月 2 7 日付で名称変更届を提出しております。  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

誘電体および気体を封入するための共振器と、前記誘電体および前記気体が封入された前記共振器に電磁波を入力し、前記電磁波の入力に応答して、前記共振器から出力された前記電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定するためのネットワークアナライザと、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から前記誘電体の複素誘電率を算出するための演算処理装置とを備えていることを特徴とする誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 2】**

前記共振器が、シリンダと、第一のピストンと、第二のピストンとを備え、前記第一のピストンが、第一の円板と、前記第一の円板の中心から垂直に延びる第一の円柱体とを備え、前記第一の円板および前記第一の円柱体には、先端部にループアンテナが取り付けられた同軸ケーブルが挿入するための第一の貫通孔が 2 つ形成され、前記第二のピストンが、第二の円板と、前記第二の円板の中心から垂直に延びる第二の円柱体とを備え、前記シリンダには、中央部に、前記第一の円柱体の外径および前記第二の円柱体の外径と等しい内径を有する第二の貫通孔が形成され、前記第二の貫通孔内には、上方から前記第一の円柱体が挿入され、下方から前記第二の円柱体が挿入され、前記シリンダの側面部には、前記シリンダの軸に略直交し、ねじを挿入するための第三の貫通孔が形成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 3】**

前記第一の円柱体の先端部または前記第二の円柱体の先端部には、円環状の溝が形成されていることを特徴とする請求項 2 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 4】**

前記第一の円柱体の先端部または前記第二の円柱体の先端部には、円環状の導体板が取り付けられていることを特徴とする請求項 2 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 5】**

前記演算処理装置が、前記誘電体が粉体状である場合に、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記共振器内の前記誘電体と前記気体とが混合した混合体の複素誘電率を算出し、算出された前記混合体の複素誘電率および前記混合体中の前記誘電体の体積比率から、前記誘電体の複素誘電率を算出することを特徴とする請求項 1 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 6】**

前記混合体の複素誘電率の算出が、前記混合体の比誘電率の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の比誘電率の算出であることを特徴とする請求項 5 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 7】**

前記誘電体の比誘電率の算出が、対数混合則、リヒトネッカーロータの式およびウイナーの式のいずれかの式を用いて行われることを特徴とする請求項 6 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 8】**

前記混合体の複素誘電率の算出が、前記混合体の誘電正接の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の誘電正接の算出であることを特徴とする請求項 5 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 9】**

前記誘電体の誘電正接の算出が、混合則の式を用いて行われることを特徴とする請求項 8 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 10】**

前記誘電体が粉体状である場合に、前記誘電体が、乾燥していることを特徴とする請求項 1 ないし 9 のいずれか 1 項に記載の粉体状の誘電体の複素誘電率の測定装置。

**【請求項 11】**

前記演算処理装置が、前記柱状の誘電体が成形物である場合に、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記誘電体の成形物の複素誘電率を算出すること特徴とする請求項 1 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 1 2】

前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の比誘電率の算出であることを特徴とする請求項 1 1 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 1 3】

前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の誘電正接の算出であることを特徴とする請求項 1 1 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 1 4】

前記電磁波の共振モードが、 $TE_{011}$ モードであることを特徴とする請求項 1 ないし 1 3 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 1 5】

前記誘電体を前記共振器内に封入し、前記共振器内の閉空間が真空であることを特徴とする請求項 1 ないし 1 4 のいずれか 1 項に記載の粉体状の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 1 6】

前記共振器の閉空間を真空にする真空装置を備えていることを特徴とする請求項 1 ないし 1 5 のいずれか 1 項に記載の粉体状の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 1 7】

所定の閉空間を有する前記共振器内に、前記閉空間の断面と同一の断面を有する柱状の誘電体の成形物および気体を封入することを特徴とする請求項 1 1 ないし 1 3 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 1 8】

誘電体および気体を、前記共振器内に形成された断面が略円形の閉空間内に封入することを特徴とする請求項 1 ないし 1 7 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 1 9】

誘電体および気体を、前記共振器内に形成された断面が略矩形状の閉空間内に封入することを特徴とする請求項 1 ないし 1 7 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 2 0】

誘電体および気体を、前記共振器内に形成された同軸状断面を有する閉空間内に封入することを特徴とする請求項 1 ないし 1 7 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】誘電体の複素誘電率の測定装置

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、誘電体の複素誘電率の測定装置に関するものであり、さらに詳細には、誘電体の複素誘電率を高い精度で測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置に関するものである。

【背景技術】

【0 0 0 2】

各種無線装置の高性能化に伴い、より高性能な高周波用のセラミックス誘電体が求められている。一般に、セラミックス誘電体は、粉体状の誘電体の形で、あるいは、粉体状の誘電体を焼成した焼成品の形で用いられている。また、粉体状の誘電体と樹脂などを種々の比率で混合した複合誘電体も、回路部品として用いられている。

【0 0 0 3】

したがって、高周波用のセラミックス誘電体を開発するにあたっては、誘電体の誘電特性として、誘電体の複素誘電率を、粉体の状態で測定することが必要不可欠になる。

【0 0 0 4】

粉体状の誘電体の複素誘電率のうち比誘電率は、たとえば、特開平 6 - 1 3 8 0 7 6 号公報などに開示されるように、一定の間隔を置いて、対向するように、一对の電極が配置された容器内に、比誘電率を測定すべき粉体状の誘電体を封入し、一对の電極間に、電圧を印加して、粉体状の誘電体と空気との混合体の比誘電率を測定し、測定された混合体の比誘電率から、算出されていた。

【0 0 0 5】

一方、粉体状の誘電体を焼成等により成形した誘電体の成形物の複素誘電率の測定は、一般には、摂動法や空洞共振器法および誘電体共振器法を用いて行われている。

【0 0 0 6】

これらの測定方法では、測定対象となる誘電体の成形物が、それぞれの測定方法で定められた所定の形状であることが必要であった。例えば、摂動法では細長い棒状に、空洞共振器法ではシート状に、誘電体共振器法では円柱状に、測定対象となる誘電体が成形されている必要があった。

【0 0 0 7】

【特許文献 1】特開平 6 - 1 3 8 0 7 6 号公報

【非特許文献 1】飯島康、「Electronic Monthly」、新光商事株式会社、1 9 9 8 年 7 月

【非特許文献 2】JIS R 1627:1996 「マイクロ波用ファインセラミックスの誘電特性の試験方法」、日本規格協会、1 9 9 6 年 7 月

【非特許文献 3】JIS R 1641:2002 「ファインセラミックス基板のマイクロ波誘電特性の試験方法」、日本規格協会、2 0 0 2 年 1 月

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0 0 0 8】

しかしながら、従来の粉体状の誘電体の比誘電率の測定方法においては、数 GHz 以上の高周波帯域において、粉体状の誘電体の比誘電率を測定する場合には、浮遊容量や浮遊リアクタンスの存在が無理できなくなり、その結果、測定装置全体が共振し、高い精度で、粉体状の誘電体の比誘電率を測定できないという問題があった。また、従来は、粉体状の誘電体の複素誘電率のうち誘電正接を、所望のように、測定する実用的な方法は知られていなかった。

【0 0 0 9】

一方、誘電体の成形物については、誘電体の種類によっては、誘電体の成形物を円柱状に成形することは容易であるが、細長い棒状や板状に成形するのが困難であり、摂動法や

空洞共振器法を用いて誘電体の複素誘電率を測定することができないという問題があった。一方、円柱状の誘電体の成形物を測定することが可能な誘電体共振器法では、複素誘電率のうち比誘電率が低い誘電体、たとえば、樹脂などについては、誘電体の比誘電率および誘電正接を測定できないという問題があった。

【0010】

したがって、本発明は、誘電体の複素誘電率を高い精度で測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置を提供することを目的とするものである。

【0011】

また、本発明の別の目的は、数GHz以上の高周波帯域においても、高い精度で、粉体状の誘電体の複素誘電率を測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置を提供することにある。

【0012】

さらに、本発明の他の目的は、複素誘電率のうち比誘電率が低い円柱状の誘電体の成形物の比誘電率も測定可能な、柱状の誘電体の成形物の複素誘電率を高い精度で、測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明のかかる目的は、誘電体および気体を封入するための共振器と、前記誘電体および前記気体が封入された前記共振器に電磁波を入力し、前記電磁波の入力に応答して、前記共振器から出力された前記電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定するためのネットワークアナライザと、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から前記誘電体の複素誘電率を算出するための演算処理装置とを備えていることを特徴とする誘電体の複素誘電率の測定装置によって達成される。

【0014】

本発明によれば、共振器内に、誘電体および気体を封入して、共振器内に電磁波を入力し、電磁波の入力に応答して、共振器から出力された電磁波のTEモードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定し、測定された共振周波数、挿入損失および電力半値幅から、誘電体の複素誘電率を算出するように構成されているから、高い精度で、誘電体の複素誘電率を測定することが可能となる。

【0015】

本発明の好ましい実施態様においては、空洞共振器が、シリンダと、第一のピストンと、第二のピストンとを備え、第一のピストンが、第一の円板と、第一の円板の中心から垂直に延びる第一の円柱体とを備え、第一の円板および前記第一の円柱体には、先端部にループアンテナが取り付けられた同軸ケーブルが挿入するための第一の貫通孔が2つ形成され、第二のピストンが、第二の円板と、第二の円板の中心から垂直に延びる第二の円柱体とを備え、シリンダが、中央部に、第一の円柱体の外径および第二の円柱体の外径と等しい内径を有する第二の貫通孔が形成され、第二の貫通孔内には、上方から第一の円柱体が挿入され、下方から第二の円柱体が挿入され、シリンダの側面部には、シリンダの軸に略直交し、ねじを挿入するための第三の貫通孔が形成されるように構成されている。

【0016】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、第一の円柱体の先端部または第二の円柱体の先端部には、円環状の溝が形成されるように構成されている。

【0017】

本発明のさらに別の好ましい実施態様においては、第一の円柱体の先端部または第二の円柱体の先端部には、円環状の導体板が取り付けられように構成されている。

【0018】

本発明のさらに好ましい実施態様によれば、第一の円柱体の先端部または第二の円柱体の先端部には、円環状の溝または円環状の導体板が形成されるように構成されているから、TEモードでの共振周波数とTMモードでの共振周波数を分離することができ、TEモードでの共振周波数を正確に測定することが可能となる。

## 【0019】

本発明の好ましい実施態様においては、演算処理装置が、誘電体が粉体状である場合に、測定された共振周波数、挿入損失および電力半値幅から、共振器内の誘電体と前記気体とが混合した混合体の複素誘電率を算出し、算出された混合体の複素誘電率および混合体中の誘電体の体積比率から、誘電体の複素誘電率を算出するように構成されている。

## 【0020】

本発明の好ましい実施態様によれば、数GHz以上の高周波帯域においても、高い精度で、粉体状の誘電体の複素誘電率を測定することが可能となる。

## 【0021】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体が粉体状である場合に、混合体の複素誘電率の算出が、混合体の比誘電率の算出であり、誘電体の複素誘電率の算出が、誘電体の比誘電率を算出するように構成されている。

## 【0022】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体が粉体状である場合に、誘電体の比誘電率の算出が、対数混合則、リヒトネッカーロータの式およびウイナーの式のいずれかの式を用いて行われるように構成されている。

## 【0023】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体が粉体状である場合に、混合体の複素誘電率の算出が、混合体の誘電正接の算出であり、誘電体の複素誘電率の算出が、誘電体の誘電正接を算出するように構成されている。

## 【0024】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体が粉体状である場合に、誘電体の誘電正接の算出が、混合則の式を用いて行われるように構成されている。

## 【0025】

本発明の好ましい実施態様においては、演算処理装置が、柱状の誘電体が成形物である場合に、測定された共振周波数、挿入損失および電力半値幅から、誘電体の成形物の複素誘電率を算出するように構成されている。

## 【0026】

本発明の好ましい実施態様によれば、複素誘電率のうち比誘電率が低い円柱状の誘電体の成形物の比誘電率も含めて、柱状の誘電体の成形物の複素誘電率を高い精度で、測定することが可能となる。

## 【0027】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、誘電体の成形物の比誘電率を算出するように構成されている。

## 【0028】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、誘電体の成形物の誘電正接を算出するように構成されている。

## 【0029】

本発明の好ましい実施態様においては、共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定するときの共振モードは、無負荷Q値が高いTE<sub>011</sub>モードを用いられるように構成されている。

## 【0030】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、乾燥している粉体状の誘電体を用いて複素誘電率が測定される。

## 【0031】

本発明のさらに好ましい実施態様によれば、測定すべき粉体状の誘電体の水分を除去した後に、粉体状の誘電体の複素誘電率が測定されるから、粉体状の誘電体の複素誘電率の測定の精度を高めることができる。

## 【0032】

本発明の好ましい実施態様においては、誘電体を共振器内に封入し、共振器内の閉空間

が真空であるように構成されている。

【0033】

本発明の好ましい実施態様によれば、共振器の閉空間に誘電体を封入し、共振器の閉空間内を真空としてから、誘電体の複素誘電率の測定を行うことにより、誘電体の複素誘電率の測定の精度を高めることができる。

【0034】

本発明の好ましい実施態様においては、共振器の閉空間を真空にする装置を備えるように構成されている。

【0035】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、所定の閉空間を有する共振器内に、閉空間の断面と同一の断面を有する柱状の誘電体の成形物および気体を封入するように構成されている。

【0036】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体および気体を、共振器内に形成された断面が略円形の閉空間内に封入するように構成されている。

【0037】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体および気体を、前記空洞共振器内に形成された断面が略矩形状の閉空間内に封入するように構成されている。

【0038】

本発明のさらに好ましい実施態様においては、誘電体および気体を、前記空洞共振器内に形成された同軸状断面を有する閉空間内に封入するように構成されている。

【発明の効果】

【0039】

本発明によれば、誘電体の複素誘電率を高い精度で測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置を提供することが可能になる。

【0040】

また、本発明によれば、数GHz以上の高周波帯域においても、高い精度で、粉体状の誘電体の複素誘電率を測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置を提供することが可能になる。

【0041】

さらに、本発明によれば、複素誘電率のうち比誘電率が低い円柱状の誘電体の成形物の比誘電率も測定可能な、柱状の誘電体の成形物の複素誘電率を高い精度で、測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置を提供することが可能になる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0042】

以下、添付図面に基づいて、本発明の好ましい実施態様につき、詳細に説明を加える。

【0043】

図1は、本発明の好ましい実施態様にかかる誘電体の複素誘電率の測定装置を示すブロック図である。ここに、粉体状の誘電体の複素誘電率は、誘電体の比誘電率および誘電体の誘電正接を意味する。

【0044】

図1に示されるように、測定装置2は、空洞共振器4とネットワークアナライザ6と演算処理装置8を備えている。

【0045】

空洞共振器4は、複素誘電率を測定すべき粉体状の誘電体および気体を封入するための円筒状の金属製容器によって構成されている。

【0046】

また、ネットワークアナライザ6は、空洞共振器4内に電磁波を入力し、電磁波の入力に応答して、空洞共振器4から出力された電磁波を受け、空洞共振器4から受けた電磁波から、共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定して、測定結果を、演算処理装置8



に出力するように構成されている。

【0047】

演算処理装置 8 は、ネットワークアナライザ 6 から入力された共振周波数、挿入損失および電力半値幅から、粉体状の誘電体の複素誘電率を算出するように構成されている。

【0048】

図 2 は、空洞共振器 4 の略斜視図であり、図 3 は、図 2 に示された空洞共振器 4 の X-X 線に沿った略断面図である。

【0049】

図 2 に示されるように、空洞共振器 4 は、シリンダ 14、第一のピストン 20、同軸ケーブル 22、ねじ 34a、34b および第二のピストン 40 を備えている。

【0050】

図 3 に示されるように、第一のピストン 20 は、第一の円板 26 と、第一の円板 26 の中心から垂直に延びる第一の円柱体 28 とを備え、第一の円板 26 および第一の円柱体 28 には、2 つの貫通孔 30a、30b が形成され、第一の円柱体 28 の先端部には、円環状の溝 32 が形成されている。

【0051】

図 3 に示されるように、同軸ケーブル 22 は、第一の円板 26 および第一の円柱体 28 に形成された 2 つの貫通孔 30a、30b 内に挿入され、同軸ケーブル 22 の先端部には、ループアンテナ 24 が取り付けられている。

【0052】

図 3 に示されるように、第二のピストン 40 は、第二の円板 42 と、第二の円板 42 の中心から垂直に延びる第二の円柱体 44 を備えている。

【0053】

図 3 に示されるように、シリンダ 14 には、その中央部に、第一のピストン 20 の第一の円柱体 28 の外径および第二のピストン 40 の第二の円柱体 44 の外径に等しい内径を有する貫通孔 16 が形成されており、貫通孔 16 内には、上方から、第一のピストン 20 の第一の円柱体 28 が挿入され、下方から、第二のピストン 40 の第二の円柱体 44 が挿入されている。

【0054】

その結果、図 3 に示されるように、シリンダ 14 の貫通孔 16 内には、第一のピストン 20 の第一の円柱体 28 と、第二のピストン 40 の第二の円柱体 44 とによって、閉空間が形成されている。

【0055】

また、シリンダ 14 には、その軸に略直交する 2 つの貫通孔 36a、36b が形成されており、貫通孔 36a 内には、第一のピストン 20 の第一の円柱体 28 の位置を調整するねじ 34a が挿入され、貫通孔 36b 内には、第二のピストン 40 の第二の円柱体 44 の位置を調整するねじ 34b が挿入されている。

【0056】

以上のように構成された測定装置 2 においては、以下のようにして、粉体状の誘電体の複素誘電率が測定される。

【0057】

粉体状の誘電体の複素誘電率を測定するにあたっては、まず、空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体が、空洞共振器 4 内に形成された閉空間内に封入され、ネットワークアナライザ 6 から、電磁波が、同軸ケーブル 22 およびループアンテナ 24 を介して、空洞共振器 4 内に出力される。

【0058】

電磁波の入力に応答して、空洞共振器 4 から、電磁波が出力され、ループアンテナ 24 によって受信される。

【0059】

ループアンテナ 24 によって受信された電磁波は、同軸ケーブル 22 を介して、ネット

ワークアナライザ 6 に入力される。

【0060】

同軸ケーブル 22 を介して、入力された電磁波から、ネットワークアナライザ 6 によって、共振モードのうち、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$ 、ならびに TE<sub>012</sub>モードでの共振周波数  $f_2$  が測定される。

【0061】

一般に、空洞共振器 4 に、ネットワークアナライザ 6 から、電磁波を入力したときは、TE<sub>011</sub>モードに対する縮退モードとして、TM<sub>111</sub>モードが存在し、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数と、TM<sub>111</sub>モードでの共振周波数が重なり合って、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数、挿入損失および電力半値幅を正確に測定できないという問題がある。しかし、本実施態様においては、第一のピストン 20 の第一の円柱体 28 の先端部には、溝 32 が形成されており、空洞共振器 4 内に形成された閉空間内には、空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体が封入されているから、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数と TM<sub>111</sub>モードでの共振周波数を分離することができ、したがって、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数を正確に測定することが可能となる。

【0062】

こうして、ネットワークアナライザ 6 によって測定された TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$ 、ならびに TE<sub>012</sub>モードでの共振周波数  $f_2$  が、ネットワークアナライザ 6 から演算処理装置 8 に出力される。

【0063】

TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$ 、ならびに TE<sub>012</sub>モードでの共振周波数  $f_2$  が、ネットワークアナライザ 6 から、演算処理装置 8 に出力されると、複素誘電率を測定すべき粉体状の誘電体 10 が、空洞共振器 4 の閉空間内に封入される。

【0064】

ここに、測定すべき粉体状の誘電体 10 は、予め、真空中に置き、または加熱等を行い、誘電体 10 に含まれる水分を除去することにより、乾燥されていることが好ましい。

【0065】

一般に、粉体状の誘電体 10 の複素誘電率の測定においては、粉体状の誘電体 10 の表面に吸着した水分の影響により、粉体状の誘電体 10 の複素誘電率の測定に誤差が生じるという問題がある。しかし、本実施態様においては、測定すべき粉体状の誘電体 10 の水分を除去した後に、粉体状の誘電体 10 の複素誘電率が測定されるから、粉体状の誘電体 10 の複素誘電率の測定の精度を高めることができる。

【0066】

その結果、図 3 に示されるように、空洞共振器 4 の閉空間内に、空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体の層 12 と、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 が形成される。

【0067】

次いで、複素誘電率を測定すべき粉体状の誘電体 10 が封入された空洞共振器 4 内に、電磁波が、ネットワークアナライザ 6 から、同軸ケーブル 22 およびループアンテナ 24 を介して、出力される。

【0068】

ネットワークアナライザ 6 から、空洞共振器 4 内に、電磁波が入力されると、電磁波の入力に応答して、空洞共振器 4 から、電磁波が出力され、ループアンテナ 24 によって受信される。

【0069】

ループアンテナ 24 によって受信された電磁波は、同軸ケーブル 22 を介して、ネットワークアナライザ 6 に入力される。

## 【0070】

同軸ケーブル 22 を介して、入力された電磁波から、ネットワークアナライザ 6 によって、共振モードのうち、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  が測定される。

## 【0071】

こうして、ネットワークアナライザ 6 によって測定された TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  が、演算処理装置 8 に出力される。

## 【0072】

演算処理装置 8 においては、ネットワークアナライザ 6 から入力された共振周波数  $f_1$ 、挿入損失  $IL_1$ 、電力半値幅  $\Delta f_1$  および共振周波数  $f_2$  が、式 (1) ないし式 (3) に代入され、空洞共振器 4 の内壁の実効導電率  $\sigma$ 、粉体状の誘電体 10 が空洞共振器 4 の閉空間内に封入されていない状態における空洞共振器 4 の無負荷 Q 値である  $Q_1$  および空洞共振器 4 の閉空間の見かけの直径  $D$  が求められる。

## 【0073】

## 【数 1】

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{c}{\pi} \sqrt{\frac{j_{n_2 m_2}^2 \cdot l_1^2 - j_{n_1 m_1}^2 \cdot l_2^2}{f_2^2 \cdot l_1^2 - f_1^2 \cdot l_2^2}} \\ H &= \frac{c}{2} \sqrt{\frac{j_{n_2 m_2}^2 \cdot l_1^2 - j_{n_1 m_1}^2 \cdot l_2^2}{f_1^2 \cdot j_{n_2 m_2}^2 - f_2^2 \cdot j_{n_1 m_1}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、

H：閉空間の見かけの高さ

D：閉空間の見かけの直径

$j'_{n_1 m_1}$ ： $n_1$  次の第一種ベッセル関数の微分を  $j'_{n_1}(x)$  としたときの  $j'_{n_1}(x)=0$  なる第  $m_1$  番目の解

$j'_{n_2 m_2}$ ： $n_2$  次の第一種ベッセル関数の微分を  $j'_{n_2}(x)$  としたときの  $j'_{n_2}(x)=0$  なる第  $m_2$  番目の解

$c$ ：真空中の光速度である。

## 【0074】

## 【数 2】

$$Q_1 = \frac{\frac{f_1}{\Delta f_1}}{1 - 10^{-IL_1/20}} \quad (2)$$

ここに、  
 $f_1$ : 共振周波数  
 $\Delta f_1$ : 電力半値幅  
 $IL_1$ : 挿入損失  
 である。

【0075】

【数3】

$$\sigma = \frac{4\pi f_1 Q^2 \left\{ j_{nm}^4 + 2 \left( j_{nm}^2 l_1 \pi \right) \left( \frac{D}{2H} \right)^3 + \left( 1 - \frac{D}{H} \right) \left( \frac{n l_1 \pi D}{2H} \right)^2 \right\}^2}{\mu_0 c^2 \left( j_{nm}^2 - n^2 \right)^2 \left\{ j_{nm}^2 + \left( \frac{l_1 \pi D}{2H} \right)^2 \right\}^3} \quad (3)$$

ここに、  
 $\sigma$ : 空洞共振器の内壁の実効導電率  
 $\mu_0$ : 真空中の透磁率  
 $\pi$ : 円周率  
 である。

【0076】

次いで、演算処理装置 8 は、ネットワークアナライザ 6 から入力された共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$ 、挿入損失  $IL_3$  および既に求められた空洞共振器 4 の閉空間の見かけの直径  $D$  ならびに閉空間内に封入された気体の層 12 の厚さ  $L_1$  および粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の厚さ  $L_2$  を、式 (4) および (5) に代入して、粉体状の誘電体 10 が空洞共振器 4 に封入された状態における空洞共振器 4 の無負荷  $Q$  値である  $Q_3$  および粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の複素誘電率のうち比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を算出する。

【0077】

ここに、気体の層 12 の厚さ  $L_1$  および粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の厚さ  $L_2$  は、予め設定された値であって、測定者によって設定されたあと、演算処理装置 8 に入力される。

【0078】

【数4】

$$Q_3 = \frac{\frac{f_3}{\Delta f_3}}{1 - 10^{-IL_3/20}} \quad (4)$$

ここに、  
 $f_3$ : 共振周波数  
 $\Delta f_3$ : 電力半値幅  
 $IL_3$ : 挿入損失

である。

【0079】

【数5】

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{\tan X_1}{X_1} + L_2 \frac{\tan X_2}{X_2} &= 0 \\ X_1 &= \beta_1 L_1 \\ X_2 &= \beta_2 L_2 \\ \beta_1 &= \sqrt{\varepsilon_{r1} k_0^2 - k_r^2} \\ \beta_2 &= \sqrt{\varepsilon_{r2} k_0^2 - k_r^2} \\ k_r &= \frac{2j'_{nm}}{D} \\ k_0 &= \frac{2\pi f_3}{c} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、

$L_1$ : 気体の層 12 の厚さ

$L_2$ : 粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の厚さ

$D$ : 閉空間の見かけの直径

$\varepsilon_{r1}$ : 気体の比誘電率

$\varepsilon_{r2}$ : 粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の比誘電率

$j'_{nm}$ :  $n$  次の第一種ベッセル関数の微分を  $j'_n(x)$  としたときの  $j'_n(x)=0$  なる第  $m$  番目の解

である。

【0080】

次いで、演算処理装置 8 は、既に算出した実効導電率  $\sigma$ 、粉体状の誘電体 10 が空洞共振器 4 に封入された状態における空洞共振器 4 の無負荷  $Q$  値である  $Q_3$ 、閉空間の見かけの直径  $D$ 、閉空間内に封入された気体の層 12 の厚さ  $L_1$  および粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の厚さ  $L_2$  を、式 (6) に代入して、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の複素誘電率のうち誘電正接を算出する。

【0081】

【数 6】

$$\begin{aligned}
\tan \delta &= \frac{A}{Q_3} - R_s B \\
A &= 1 + \frac{W_{e1}}{W_{e2}} \\
B &= \frac{P_{cy1} + P_{cy2} + P_{end1} + P_{end2}}{2\omega W_{e2} R_s} \\
W_{e1} &= \frac{1}{8} \varepsilon_{r1} \omega^2 \mu_0^2 j_{01}'^2 J_0^2(j_{01}') \pi L_1 \left( 1 - \frac{\sin 2X_1}{2X_1} \right) \\
W_{e2} &= \frac{1}{8} \varepsilon_{r2} \omega^2 \mu_0^2 j_{01}'^2 J_0^2(j_{01}') \pi L_2 \left( 1 - \frac{\sin 2X_2}{2X_2} \right) \frac{\sin^2 X_1}{\sin^2 X_2} \\
P_{cy1} &= \frac{1}{4} R_s k_r^4 J_0^2(j_{01}') D \pi L_1 \left( 1 - \frac{\sin 2X_1}{2X_1} \right) \\
P_{cy2} &= \frac{1}{4} R_s k_r^4 J_0^2(j_{01}') D \pi L_2 \left( 1 - \frac{\sin 2X_2}{2X_2} \right) \frac{\sin^2 X_1}{\sin^2 X_2} \\
P_{end1} &= \frac{1}{2} R_s \left( \frac{X_1}{L_1} \right)^2 j_{01}'^2 \pi J_0^2(j_{01}') \\
P_{end2} &= \frac{1}{2} R_s \left( \frac{X_2}{L_2} \right)^2 j_{01}'^2 \pi J_0^2(j_{01}') \frac{\sin^2 X_1}{\sin^2 X_2} \\
R_s &= \sqrt{\frac{\pi f_3 \mu_0}{\sigma}} \\
\omega &= 2\pi f_3
\end{aligned} \tag{6}$$

ここに、

$Q_3$ : 粉体状の誘電体 10 が空洞共振器 4 に封入された状態における空洞共振器 4 の無負荷  $Q$  値

$W_{e1}$ : 気体の層 12 の電界の蓄積エネルギー

$W_{e2}$ : 粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の電界の蓄積エネルギー

$P_{cy1}$ : 気体の層 12 の側壁における導体損

$P_{cy2}$ : 粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の側壁における導体損

$P_{end1}$ : 気体の層 12 のピストン端面における導体損

$P_{end2}$ : 粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 のピストン端面における導体損

$\omega$ : 角周波数

$R_s$ : 空洞共振器の内壁の表面抵抗

$j'_0$ : 0 次の第一種ベッセル関数の微分を  $j'_0(x)$  としたときの  $j'_0(x)=0$  なる第一番目の解である。

【0082】

こうして、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の複素誘電率として比誘電率  $\epsilon_{r2}$  および誘電正接が算出される。

【0083】

さらに、演算処理装置 8 は、こうして算出した粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を対数混合則、リヒトネッカーロータの式またはウイナーの式などの、粉体と気体とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  から粉体状の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出する式に適用して、粉体状の誘電体 10 の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出する。

【0084】

周知のように、対数混合則は、次式によって表される。

【0085】

$$\log \epsilon_r = v_1 \log \epsilon_{r1} + v_2 \log \epsilon_{r2}$$

また、リヒトネッカーロータの式は、次式によって表される。

【0086】

$$\epsilon_r^k = v_1 \epsilon_{r1}^k + v_2 \epsilon_{r2}^k$$

一方、ウイナーの式は、次式によって表される。

【0087】

$$1/(\epsilon_r + u) = v_1/(\epsilon_{r1} + u) + v_2/(\epsilon_{r2} + u)$$

ここに、

$\epsilon_r$  : 粉体状の誘電体の比誘電率

$\epsilon_{r1}$  : 気体の比誘電率

$\epsilon_{r2}$  : 粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の比誘電率

$v_1$  : 気体の体積比率

$v_2$  : 粉体状の誘電体の体積比率

$k$  : フィッティングパラメータ ( $-1 \leq k \leq 1$ )

$u$  : フィッティングパラメータ ( $0 \leq u$ )

である。

【0088】

これらの式によって、粉体状の誘電体の比誘電率  $\epsilon_r$  が算出される。

【0089】

たとえば、気体として空気を用い、粉体状の誘電体 10 と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  から、粉体状の誘電体 10 の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出する場合には、空気の比誘電率  $\epsilon_{r1}$  は 1.0 であり、また、空気の体積比率  $v_1$  および粉体状の誘電体の体積比率  $v_2$  は、混合体の層 18 に封入される気体の体積および粉体状の誘電体 10 の体積により決定されるから、粉体状の誘電体 10 と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  が求められれば、粉体状の誘電体 10 の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出することができる。

【0090】

さらに、演算処理装置 8 は、こうして算出した粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接を、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接を粉体と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接から、粉体状の誘電正接を算出する式である混合則の式に適用して、粉体状の誘電体 10 の誘電正接を算出する。

【0091】

周知のように、混合則は、次式によって表される。

【0092】

$$\tan \delta = v_1 \tan \delta_1 + v_2 \tan \delta_2$$

ここに、

$\tan \delta$  : 粉体状の誘電体の誘電正接

$\tan \delta_1$ : 気体の誘電正接

$\tan \delta_2$ : 粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接

$v_1$ : 気体の体積比率

$v_2$ : 粉体状の誘電体の体積比率

である。

【0093】

これらの式によって、粉体状の誘電体の誘電正接が算出される。

【0094】

たとえば、気体として空気を用い、粉体状の誘電体 10 と空気とが混合した混合体の層 18 の誘電正接から、粉体状の誘電体 10 の誘電正接を算出する場合には、空気の誘電正接  $\tan \delta_1$  は 0 と見なすことができ、また、粉体状の誘電体の体積比率  $v_2$  は、混合体の層 18 に封入される気体の体積および粉体状の誘電体 10 の体積により決定されるから、粉体状の誘電体 10 と空気とが混合した混合体の層 18 の誘電正接  $\tan \delta_2$  が求められれば、粉体状の誘電体 10 の誘電正接を算出することができる。

【0095】

以上のようにして、粉体状の誘電体 10 の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接が求められ、結果として粉体状の誘電体 10 の複素誘電率が求められる。

【0096】

本実施態様においては、数 GHz 以上の高周波帯域での誘電体の複素誘電率のうち比誘電率を測定する場合に、空洞共振器 4 内に、粉体状の誘電体および気体を封入し、ネットワークアナライザ 6 から空洞共振器 4 内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器 4 からネットワークアナライザ 6 に入力された電磁波の TE モードにおける共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$  および挿入損失  $IL_3$  を測定して、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を算出し、さらに、算出した粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、対数混合則、リヒトネッカーロータの式またはウイナーの式などの、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  から粉体状の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出する式に適用して、粉体状の誘電体 10 の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出するように構成されている。

【0097】

したがって、本実施態様によれば、数 GHz 以上の高周波帯域においても、粉体状の誘電体 10 の複素誘電率のうち比誘電率を、高い精度で、測定することが可能となる。

【0098】

また、本実施態様においては、数 GHz 以上の高周波帯域での誘電体の複素誘電率のうち誘電正接を測定する場合に、空洞共振器 4 内に、粉体状の誘電体および気体を封入し、ネットワークアナライザ 6 から空洞共振器 4 内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器 4 からネットワークアナライザ 6 に入力された電磁波の TE モードにおける共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$  および挿入損失  $IL_3$  を測定して、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接を算出し、さらに、粉体状の誘電体 10 と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接から粉体状の誘電正接を算出する混合則の式に適用して、粉体状の誘電体 10 の誘電正接を算出するように構成されている。

【0099】

したがって、本実施態様によれば、数 GHz 以上の高周波帯域においても、粉体状の誘電体 10 の複素誘電率のうち誘電正接を、高い精度で、測定することが可能となる。

【0100】

さらに、本実施態様においては、粉体状の誘電体の複素誘電率の測定装置では、測定対象が、柱状の誘電体の成形物である場合にも、円柱状の誘電体の成形物の断面の径が、貫通孔 16 の内径と等しくなるように成形されていれば、粉体状の誘電体の複素誘電率を測定する場合と同様に、柱状の誘電体の成形物の複素誘電率を測定することができる。

【0101】

すなわち、空洞共振器 4 内に、円柱状の誘電体の成形物および気体を封入し、ネットワ



ークアナライザ6から空洞共振器4内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器4からネットワークアナライザ6に入力された電磁波のTEモードにおける共振周波数 $f_3$ 、電力半値幅 $\Delta f_3$ および挿入損失 $IL_3$ を測定することにより、円柱状の誘電体の成形物の複素誘電率を求めることができる。

#### 【0102】

ここに、円柱状の誘電体の成形物の複素誘電率の算出においては、演算処理装置8は、対数混合則、リヒトネッカーロータの式またはウイナーの式を用いることなく、円柱状の誘電体の成形物の比誘電率を算出することが可能であり、また、混合則の式を用いることなく、円柱状の誘電体の成形物の誘電正接を算出することが可能である。

#### 【0103】

したがって、本実施態様によれば、円柱状の誘電体の成形物の複素誘電率を、高い精度で、測定することが可能となる。

#### 【0104】

また、本実施態様においては、空洞共振器4内に誘電体10を封入してから真空装置を用いることにより、空洞共振器4の閉空間を真空にすることができる。

#### 【0105】

図4は、空洞共振器4の閉空間を真空にするための真空装置を含む誘電体の複素誘電率の測定装置を表した図である。

#### 【0106】

図4に示されるように、真空装置46は、真空槽48と真空ポンプ50を備えている。真空槽48は、真空槽48に接続されている真空ポンプ50を用いることによって、真空の状態となる。真空槽48の内部には、空洞共振器4が設けられおり、真空槽48の内部を真空状態にすることによって、結果として空洞共振器4の閉空間も真空の状態となる。

#### 【0107】

空洞共振器4内に誘電体10を封入してから、真空装置46を用いて、空洞共振器4の内部を真空状態にすることにより、誘電体10に含まれる水分を除去することが可能となる。誘電体10に含まれる水分を除去した状態で、上述した粉体状の誘電体10および柱状の誘電体10の成形物の複素誘電率の測定と同様に、空洞共振器4に封入した誘電体10の複素誘電率を測定することにより、誘電体10の複素誘電率の測定の精度を高めることができる。

#### 【0108】

以下、本発明の効果をより明瞭なものとするため、実施例を掲げる。

#### 【実施例1】

#### 【0109】

密度が $3.99\text{ g/cm}^3$ で、平均粒径が $9.8\text{ }\mu\text{m}$ の粉体状の $\text{Al}_2\text{O}_3$ の試料A、密度が $3.99\text{ g/cm}^3$ で、平均粒径が $17.8\text{ }\mu\text{m}$ の粉体状の $\text{Al}_2\text{O}_3$ の試料Bおよび密度が $3.99\text{ g/cm}^3$ で、平均粒径が $34.7\text{ }\mu\text{m}$ の粉体状の $\text{Al}_2\text{O}_3$ の試料Cを用意した。

#### 【0110】

測定装置として、図1に示された測定装置2を用いて、空洞共振器4に形成された閉空間内に、体積比率が0.39となるように、試料Aを封入し、真空中で試料Aと空気が混合した混合体の層18の比誘電率および誘電正接を測定した。

#### 【0111】

まず、空洞共振器4に形成された直径16mmの貫通孔16の下方から、第二のピストン40を挿入し、位置決めして、ねじ34bにより固定する。さらに、貫通孔16の上方から、第一のピストン20を挿入し、空気の層12の厚さ $L_1$ が12mmとなるように、第一のピストン20を位置決めして、第一のピストン20を、ねじ34aにより固定し、空洞共振器4内に、空気を封入した。

#### 【0112】

次いで、ネットワークアナライザ6から、周波数がGHz以上の電磁波を、同軸ケーブル

ル 2 2 およびループアンテナ 2 4 を介して、空洞共振器 4 内に出力した。

【0 1 1 3】

さらに、電磁波の入力に応答して、空洞共振器 4 から出力された電磁波を、ループアンテナ 2 4 によって受信し、同軸ケーブル 2 2 を介して、ネットワークアナライザ 6 に入力した。

【0 1 1 4】

次いで、同軸ケーブル 2 2 を介して、入力された電磁波から、ネットワークアナライザ 6 によって、共振モードのうち、 $TE_{011}$ モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$  ならびに  $TE_{012}$ モードでの共振周波数  $f_2$  を測定した。

【0 1 1 5】

こうして、ネットワークアナライザ 6 によって測定された  $TE_{011}$ モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$  ならびに  $TE_{012}$ モードでの共振周波数  $f_2$  を、ネットワークアナライザ 6 から演算処理装置 8 に出力した。

【0 1 1 6】

$TE_{011}$ モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$  ならびに  $TE_{012}$ モードでの共振周波数  $f_2$  を、ネットワークアナライザ 6 から、演算処理装置 8 に出力したのち、貫通孔 1 6 から、一旦、第一のピストン 2 0 を外して、貫通孔 1 6 内に、3. 1 3 g の試料 A を投入した。次いで、第一のピストン 2 0 とは異なり、ピストンを構成する円柱体の先端部が平坦であるピストンを用いて、試料 A と気体とが混合した混合体の層 1 8 の厚さ  $L_2$  が 1 0 mm になるように加圧し、試料 A の表面をならしてから、再度、第一のピストン 2 0 を貫通孔 1 6 の上方から挿入し、空気の層 1 2 の厚さ  $L_1$  が 2 mm となるように、第一のピストン 2 0 の位置を調整し、第一のピストン 2 0 を、ねじ 3 4 a によって固定した。

【0 1 1 7】

さらに、試料 A が封入された空洞共振器 4 に、ネットワークアナライザ 6 から、電磁波を、同軸ケーブル 2 2 およびループアンテナ 2 4 を介して、出力し、電磁波の入力に応答して、空洞共振器 4 から出力された電磁波を、ループアンテナ 2 4 によって受信し、同軸ケーブル 2 2 を介して、ネットワークアナライザ 6 に入力した。

【0 1 1 8】

同軸ケーブル 2 2 を介して、入力された電磁波から、ネットワークアナライザ 6 によって、共振モードのうち、 $TE_{011}$ モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  を測定した。

【0 1 1 9】

こうして、ネットワークアナライザ 6 によって測定された  $TE_{011}$ モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  を、ネットワークアナライザ 6 から演算処理装置 8 に出力した。

【0 1 2 0】

次いで、演算処理装置 8 により、ネットワークアナライザ 6 から入力された共振周波数  $f_1$ 、挿入損失  $IL_1$ 、電力半値幅  $\Delta f_1$  および共振周波数  $f_2$  を、式 (1) ないし式 (3) に代入し、空洞共振器 4 の内壁の実効導電率  $\sigma$ 、試料 A が空洞共振器 4 の閉空間内に封入されていない状態における空洞共振器 4 の無負荷 Q 値である  $Q_1$  および空洞共振器 4 の閉空間の見かけの直径 D を求めた。

【0 1 2 1】

さらに、演算処理装置 8 により、ネットワークアナライザ 6 から入力された共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$ 、挿入損失  $IL_3$  および既に求めた空洞共振器 4 の閉空間の見かけの直径 D ならびに閉空間内に封入された空気の層 1 2 の厚さ  $L_1$  および試料 A と空気とが混合した混合体の層 1 8 の厚さ  $L_2$  を、式 (4) および (5) に代入して、試料 A が空洞共振器 4 に封入された状態における空洞共振器 4 の無負荷 Q 値である  $Q_3$  および試料 A と空気とが混合した混合体の層 1 8 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を求めた。

## 【0122】

次いで、演算処理装置 8 により、既に算出した実効導電率  $\sigma$ 、試料 A が空洞共振器 4 に封入された状態における空洞共振器 4 の無負荷 Q 値である  $Q_3$ 、閉空間のみかけの直径 D、閉空間内に封入された気体の層 12 の厚さ  $L_1$  および試料 A と気体とが混合した混合体の層 18 の厚さ  $L_2$  を、式 (6) に代入して、試料 A と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接を求めた。

## 【0123】

こうして、体積比率が 0.39 である試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  および誘電正接が得られた。

## 【0124】

次いで、空洞共振器 4 に形成された閉空間内に封入する試料 A の質量を変化させて、試料 A の体積比率を、0.54 まで、徐々に変化させて、試料 A の体積比率が 0.39 のときと同様に、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  および誘電正接を求めた。

## 【0125】

さらに、演算処理装置 8 により、異なる体積比率で、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  から、試料 A の比誘電率  $\epsilon_r$  を、以下のようにして、求めた。

## 【0126】

まず、試料 A の比誘電率  $\epsilon_r$  の測定精度を向上させるために、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  の測定誤差を考慮して、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、対数混合則、リヒトネッカーロータの式およびウイナーの式にフィッティングし、横軸を、試料 A の体積比率、縦軸を、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  とし、グラフを作成した。

## 【0127】

図 5 および図 6 は、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、対数混合則にフィッティングして、得られたグラフであり、図 6 は、図 5 に示されたグラフを拡大したもので、試料 A の体積比率が 0.38 ないし 0.54 の範囲にあるときのグラフを示している。

## 【0128】

図 7 および図 8 は、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、リヒトネッカーロータの式にフィッティングして、得られたグラフであり、図 8 は、図 7 に示されたグラフを拡大したもので、試料 A の体積比率が 0.38 ないし 0.54 の範囲にあるときのグラフを示している。

## 【0129】

図 9 および図 10 は、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、ウイナーの式にフィッティングして、得られたグラフであり、図 10 は、図 9 に示されたグラフを拡大したもので、試料 A の体積比率が 0.38 ないし 0.54 の範囲にあるときのグラフを示している。

## 【0130】

図 5、図 7 および図 9 において、試料 A の体積比率が 1.0 であるということは、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 中に、空気が存在せず、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 中に、試料 A のみが存在していることを意味しているから、試料 A の体積比率が 1.0 のときの比誘電率の値が、試料 A の比誘電率  $\epsilon_r$  に対応し、したがって、図 5、図 7 および図 9 に示された曲線から、試料 A の体積比率が 1.0 のときの比誘電率の値を読み取って、試料 A の比誘電率  $\epsilon_r$  を求めた。

## 【0131】

こうして、試料 A の比誘電率  $\epsilon_r$  が得られた。

## 【0132】

さらに、演算処理装置 8 により、異なる体積比率で、試料 A と空気とが混合した混合体

の層 18 の誘電正接から、試料 A の誘電正接を、以下のようにして、求めた。

【0133】

試料 A の誘電正接の測定精度を向上させるために、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層 18 の誘電正接の測定誤差を考慮して、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層 18 の誘電正接を、混合則の式に代入し、試料 A の体積比率と、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の誘電正接との関係を、原点を通る直線によって近似し、図 11 に示されるグラフを作成した。

【0134】

図 11 において、試料 A の体積比率が 1.0 であるということは、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 中に、空気が存在せず、試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 中に、試料 A のみが存在していることを意味しているから、試料 A の体積比率が 1.0 のときの誘電正接の値が、試料 A の誘電正接に対応し、したがって、図 11 に示された曲線から、試料 A の体積比率が 1.0 のときの誘電正接の値を読み取って、試料 A の誘電正接を求めた。

【0135】

次いで、試料 A の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接を測定した場合と同様にして、試料 B の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接を求めた。

【0136】

すなわち、試料 A の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接を測定した場合と同様にして、空洞共振器 4 に形成された閉空間内に封入する試料 B の質量を変化させることによって、試料 B の体積比率を 0.39 ないし 0.54 の範囲で変化させて、試料 B と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  および誘電正接を求め、試料 B の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接を求めた。

【0137】

さらに、試料 A および試料 B の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接を測定した場合と同様にして、試料 C の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接を求めた。

【0138】

試料 A、B、C の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接の測定結果は、表 1 に示されている。

【0139】

【表 1】

記号	対数混合則	リヒトネッカーロータの式	ウィーナの式	誘電正接
A	13.11	9.14	12.34	0.0044
B	12.72	9.63	12.77	0.0031
C	12.33	8.27	10.58	0.0017

表 1 に示されるように、試料 A、B、C の比誘電率として、8.6 ないし 13.1 の範囲内の値が得られ、本発明によれば、GHz 以上の周波数における粉体状の誘電体の比誘電率が測定可能であることが判明した。

【0140】

また、本発明によれば、GHz 以上の周波数における粉体状の誘電正接が測定可能であることも明らかになった。

【実施例 2】

【0141】

比誘電率および誘電正接の測定対象として、8.05 mm の厚さと 16 mm の直径を有するテトラフルオロエチレン円柱を用意し、テトラフルオロエチレン円柱を空洞共振器 4 内に封入する前の空気の層の厚さ  $L_1$  を 10.05 mm とし、実施例 1 と同様にして、テ

トラフルオロエチレン円柱の比誘電率および誘電正接を測定した。

【0142】

すなわち、空洞共振器 4 内に、テトラフルオロエチレン円柱および気体を封入し、ネットワークアナライザ 6 から空洞共振器 4 内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器 4 からネットワークアナライザ 6 に入力された電磁波の TE モードにおける共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$  および挿入損失  $IL_3$  を測定することにより、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  および誘電正接を求めた。

【0143】

(比較例)

実施例 2 との比較例として、1.04 mm の厚さを有するシート状のテトラフルオロエチレンを用意した。JIS 規格で定められている空洞共振器法を用いて、周波数 11.4 GHz および 17.9 GHz におけるシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率および誘電正接を求めた。

【0144】

実施例 2 および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率および誘電正接ならびにシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率および誘電正接を測定した結果は、表 2 に示されている。

【0145】

【表 2】

	周波数 [GHz]	比誘電率	誘電正接
実施例 1	20.6	2.05	0.00021
比較例	11.4	2.06	0.00021
比較例	18.0	2.06	0.00019

また、実施例 2 および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率およびシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率を測定した結果は、図 12 に示されている。

【0146】

さらに、実施例 2 および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の誘電正接およびシート状のテトラフルオロエチレンの誘電正接を測定した結果は、図 13 に示されている。

【0147】

実施例 2 のテトラフルオロエチレン円柱の比誘電率と、比較例のシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率は、2.05 前後のほぼ等しい値となった。

【0148】

また、実施例 2 の円柱状のテトラフルオロエチレンの誘電正接と、比較例のシート状のテトラフルオロエチレンの誘電正接は、0.0002 前後のほぼ等しい値となった。

【0149】

本発明は、以上の実施態様および実施例に限定されることはなく、特許請求の範囲に記載された発明の範囲内で種々の変更が可能であり、それらも本発明の範囲内に包含されるものであることはいうまでもない。

【0150】

たとえば、前記実施態様および前記実施例においては、共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定するときの共振モードとして、TE<sub>011</sub>モードが用いられているが、共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定するときの共振モードとして、TE<sub>011</sub>モードを用いることは必ずしも必要でなく、TE<sub>011</sub>以外の TE モードまたは TM モードを用いることもできる。

## 【0 1 5 1】

また、前記実施態様および前記実施例においては、共振器として空洞共振器が用いられているが、共振器として空洞共振器を用いることは必ずしも必要でなく、同軸共振器や、誘電体共振器を用いることもできる。

## 【0 1 5 2】

さらに、前記実施態様および前記実施例においては、空洞共振器が円筒状に形成されているが、空洞共振器が円筒状に形成されていることは必ずしも必要でない。

## 【0 1 5 3】

また、前記実施態様および前記実施例においては、誘電体に混合する気体として、空気が用いられているが、誘電体に、空気を混合することは必ずしも必要でなく、アルゴンガスや窒素ガスを誘電体に混合させてもよい。

## 【0 1 5 4】

さらに、前記実施態様および前記実施例においては、空洞共振器内の閉空間内に、空気が封入されているが、空洞共振器内の閉空間内に、空気が封入されていることは、必ずしも必要でなく、空気に代えて、空洞共振器内の閉空間内に、低損失の誘電体を充填してもよい。

## 【0 1 5 5】

また、前記図 1 に示されている実施態様および前記実施例においては、空洞共振器内の閉空間内に、空気が封入されているが、空洞共振器内の閉空間内に空気を封入することは必ずしも必要でなく、空洞共振器の閉空間に誘電体を封入してから、空洞共振器の閉空間内を真空としてもよい。

## 【0 1 5 6】

さらに、前記実施態様および前記実施例においては、第一の円柱体 2 8 および第一の円柱体 4 4 を固定するために、ねじ 3 4 a、3 4 b が用いられているが、第一の円柱体 2 8 および第二の円柱体 4 4 を固定するために、ねじ 3 4、3 4 b を用いることは必ずしも必要ではなく、シリンダと第一の円板 2 6 の間に板を挿入することによって、第一の円柱体 2 8 を固定し、またはシリンダと第二の円板 4 2 の間に板を挿入することによって、第二の円柱体 4 4 を固定するようにしてもよい。

## 【0 1 5 7】

また、前記実施態様および前記実施例においては、第一の円柱体 2 8 の先端部に、円環状の溝 3 2 が形成されているが、 $TE_{011}$ モードの共振周波数と $TM_{111}$ モードの共振周波数が分離することができれば、第一の円柱体 2 8 の先端部の形状はとくに限定されるものではなく、第一の円柱体 2 8 の先端部に、円環状の導体板または誘電体板を取り付けてもよく、溝 3 2 が第一の円柱体 2 8 の先端部に形成されていることは必ずしも必要でない。

## 【0 1 5 8】

さらに、前記実施態様および前記実施例においては、第一の円柱体 2 8 の先端部に、円環状の溝 3 2 が形成されているが、 $TE_{011}$ モードの共振周波数と $TM_{111}$ モードの共振周波数が分離することができれば、第一の円柱体 2 8 の先端部に円環状の溝 3 2 が形成されていることは必ずしも必要でなく、第二の円柱体 4 4 の先端部に溝 3 2 が形成されてもよく、また、第二の円柱体 4 4 の先端部に、円環状の導体板または誘電体板が取り付けられていてもよい。

## 【0 1 5 9】

また、前記実施態様および前記実施例においては、ループアンテナ 2 4 は、第一の円板 2 6 および第一の円柱体 2 8 に形成された 2 つの貫通孔 3 0 a、3 0 b 内に挿入された、同軸ケーブル 2 2 の先端部に取り付けられているが、ループアンテナ 2 4 は、第一の円板 2 6 および第一の円柱体 2 8 側に 2 本取り付けられていることは、必ずしも必要がない。すなわち、ループアンテナ 2 4 は、第二の円板 4 2 および第二の円柱体 4 4 に 2 つの貫通孔を形成し、この形成された貫通孔に挿入された同軸ケーブル 2 2 の先端部に取り付けられてもよく、また、第一の円板 2 6 および第一の円柱体 2 8 ならびに第二の円板 4 2 および第二の円柱体 4 4 に 1 つの貫通孔を形成し、この形成された貫通孔に挿入された同軸ケ

ーブル 2 2 の先端部に取り付けられてもよい。

【図面の簡単な説明】

【0 1 6 0】

【図 1】図 1 は、本発明の好ましい実施態様にかかる粉体状の誘電体の複素誘電率の測定装置のブロック図である。

【0 1 6 1】

【図 2】図 2 は、空洞共振器の略斜視図である。

【0 1 6 2】

【図 3】図 3 は、図 2 に示された空洞共振器の X - X 線に沿った略断面図である。

【0 1 6 3】

【図 4】図 4 は、空洞共振器の閉空間を真空にするための真空装置を含む誘電体の複素誘電率の測定装置を表した図である。

【0 1 6 4】

【図 5】図 5 は、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、対数混合則にフィッティングして、得られたグラフである。

【0 1 6 5】

【図 6】図 6 は、図 5 の一部拡大図である。

【0 1 6 6】

【図 7】図 7 は、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、リヒトネッカーロータの式にフィッティングして、得られたグラフである。

【0 1 6 7】

【図 8】図 8 は、図 5 の一部拡大図である。

【0 1 6 8】

【図 9】図 9 は、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、ウイナーの式にフィッティングして、得られたグラフである。

【0 1 6 9】

【図 1 0】図 1 0 は、図 5 の一部拡大図である。

【0 1 7 0】

【図 1 1】図 1 1 は、試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の誘電正接を、混合則の式に代入し、試料 A の体積比率と、試料 A と空気とが混合した混合体の誘電正接との関係を、原点を通る直線によって近似しグラフである。

【0 1 7 1】

【図 1 2】図 1 2 は、実施例 2 および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率およびシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率を測定した結果を示すグラフである。

【0 1 7 2】

【図 1 3】図 1 3 は、実施例 2 および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の誘電正接およびシート状のテトラフルオロエチレンの誘電正接を測定した結果を示すグラフである。

【符号の説明】

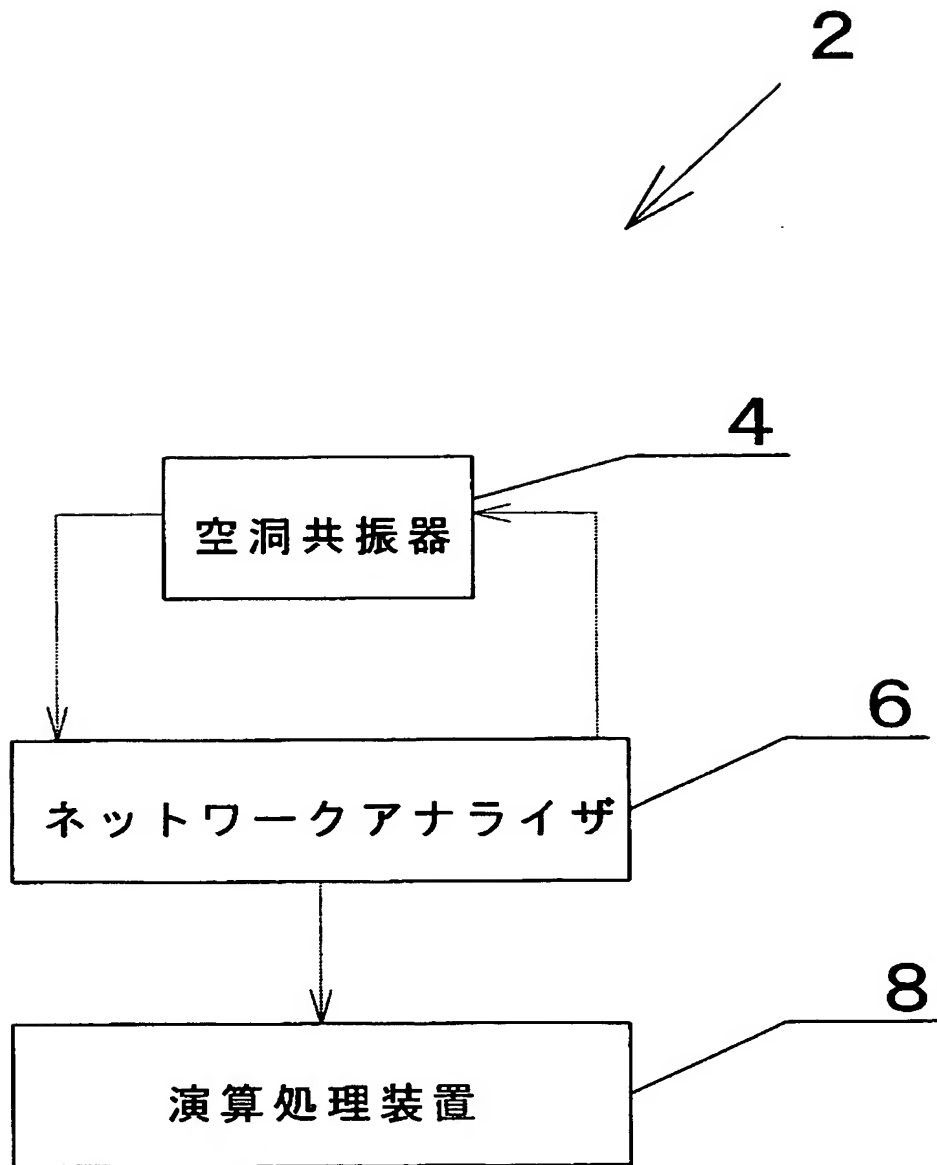
【0 1 7 3】

2	測定装置
4	空洞共振器
6	ネットワークアナライザ
8	演算処理装置
1 0	誘電体
1 2	空気の間
1 4	シリンダ

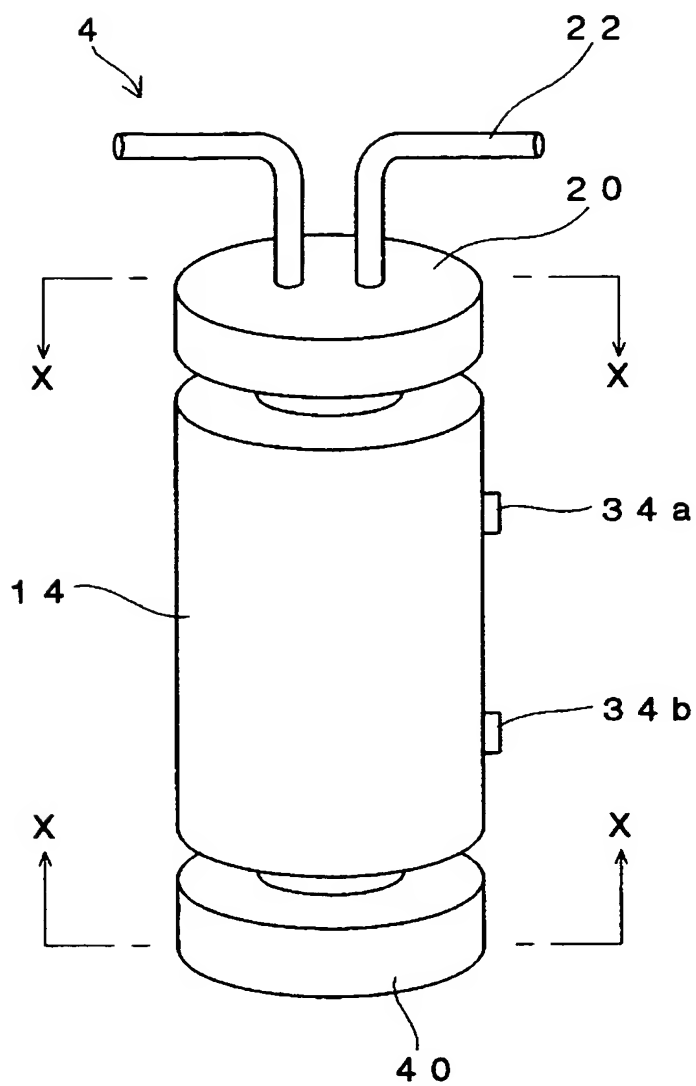
1 6	貫通孔
1 8	混合体の層
2 0	第一のピストン
2 2	同軸ケーブル
2 4	ループアンテナ
2 6	第一の円板
2 8	第一の円柱体
3 0 a	貫通孔
3 0 b	貫通孔
3 2	溝
3 4	ねじ
3 6 a	貫通孔
3 6 b	貫通孔
4 0	第二のピストン
4 2	第二の円板
4 4	第二の円柱体
4 6	真空装置
4 8	真空ポンプ
5 0	真空槽



【書類名】 図面  
【図 1】



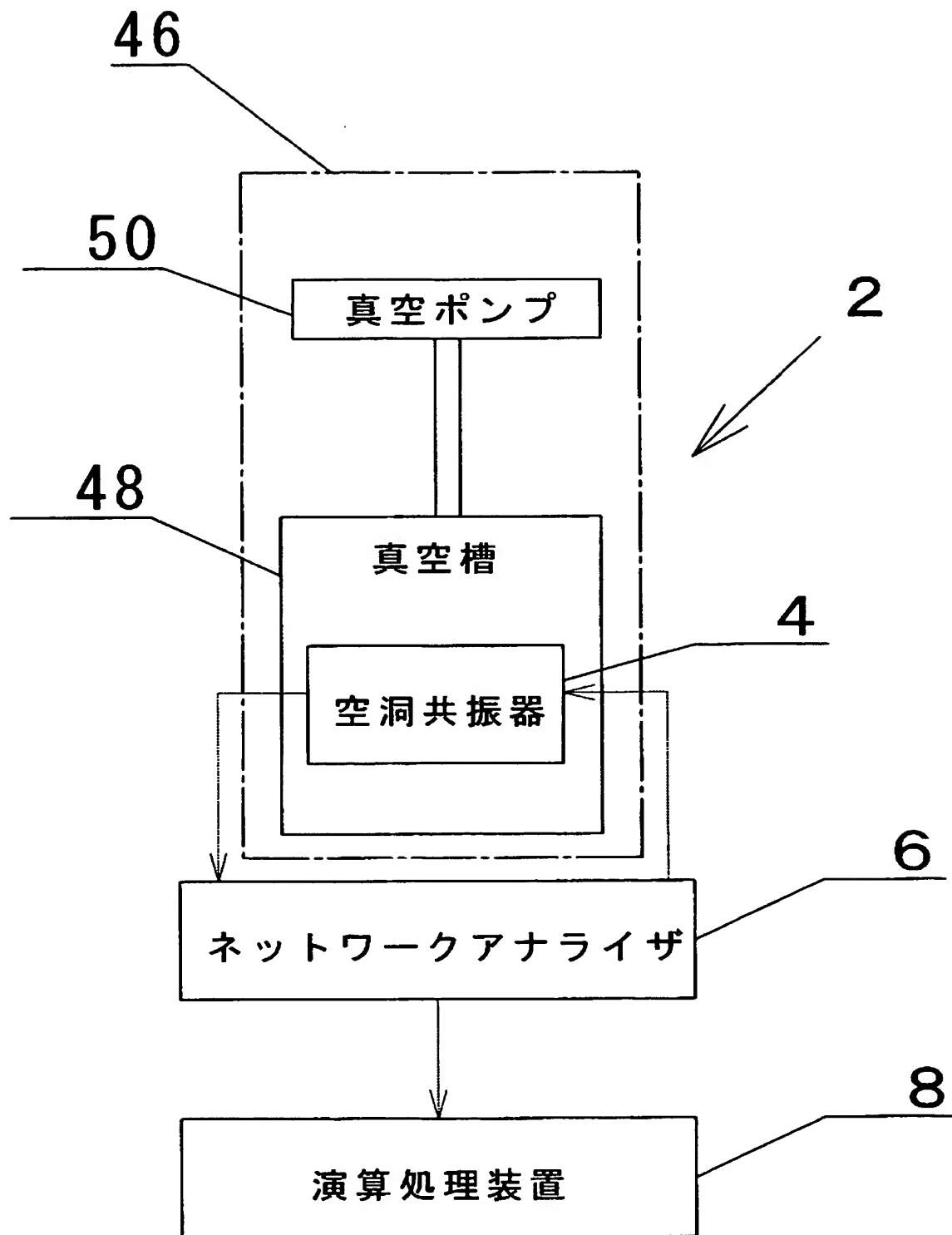
【図 2】



BEST AVAILABLE COPY

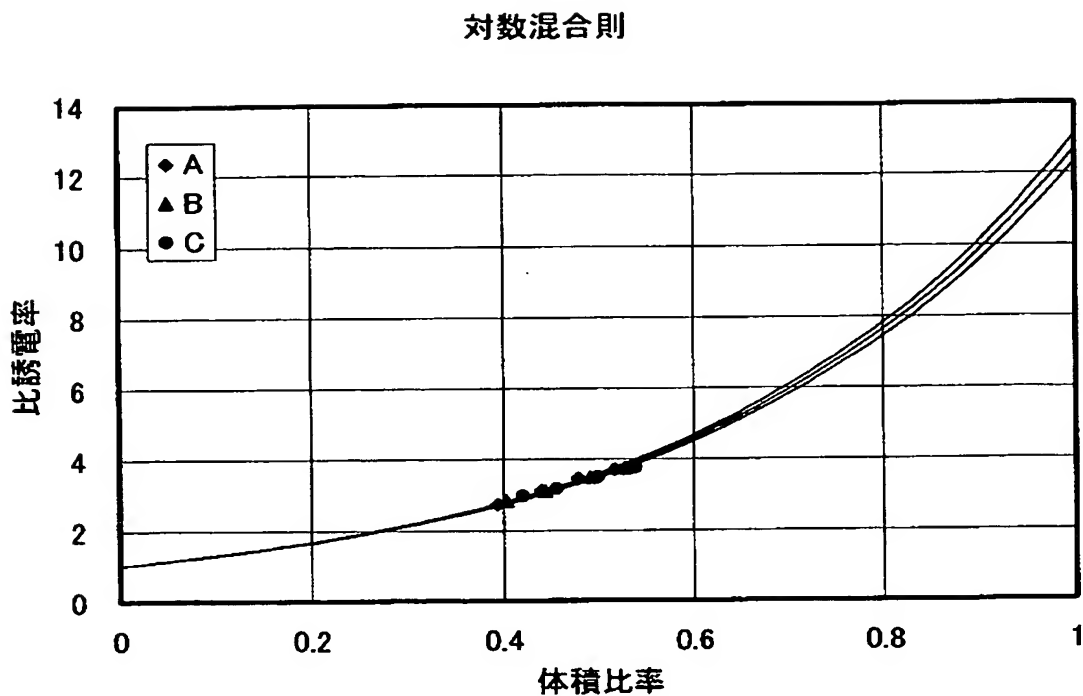


【図 4】

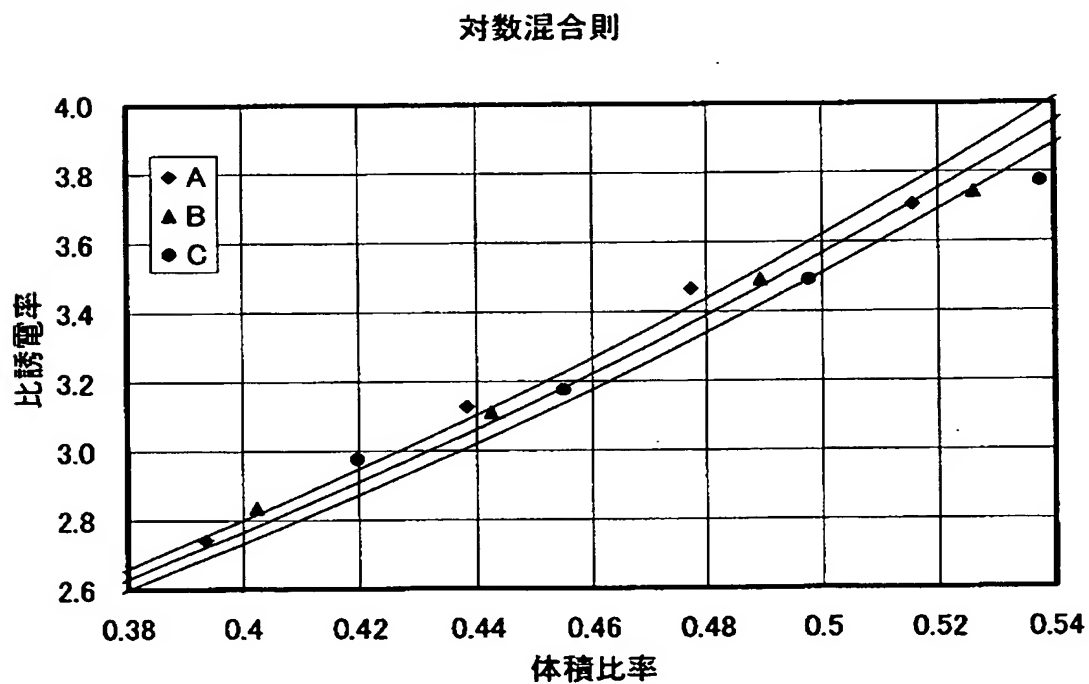


BEST AVAILABLE COPY

【図 5】



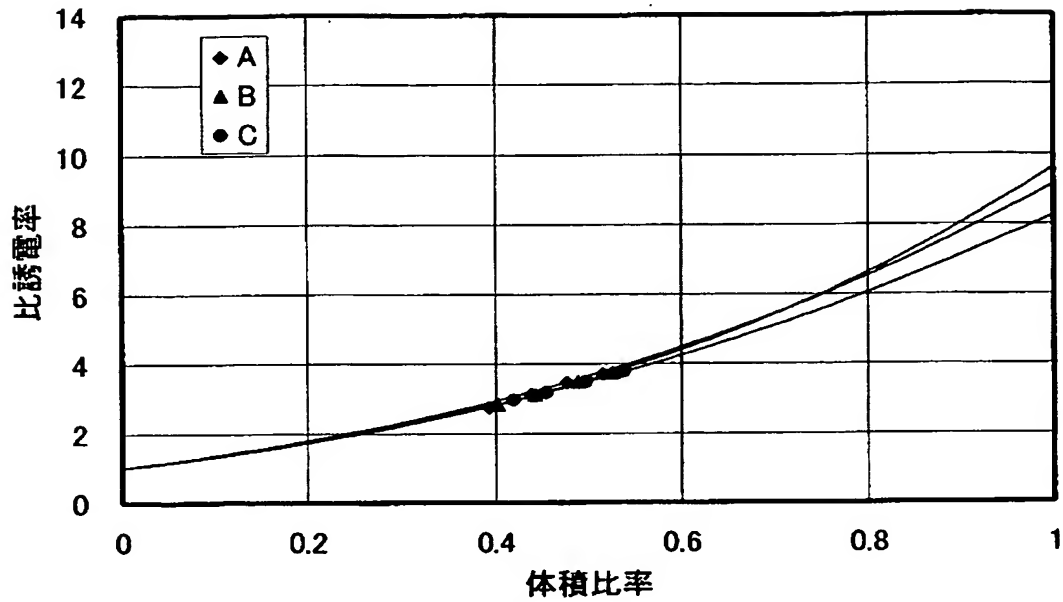
【図 6】



BEST AVAILABLE COPY

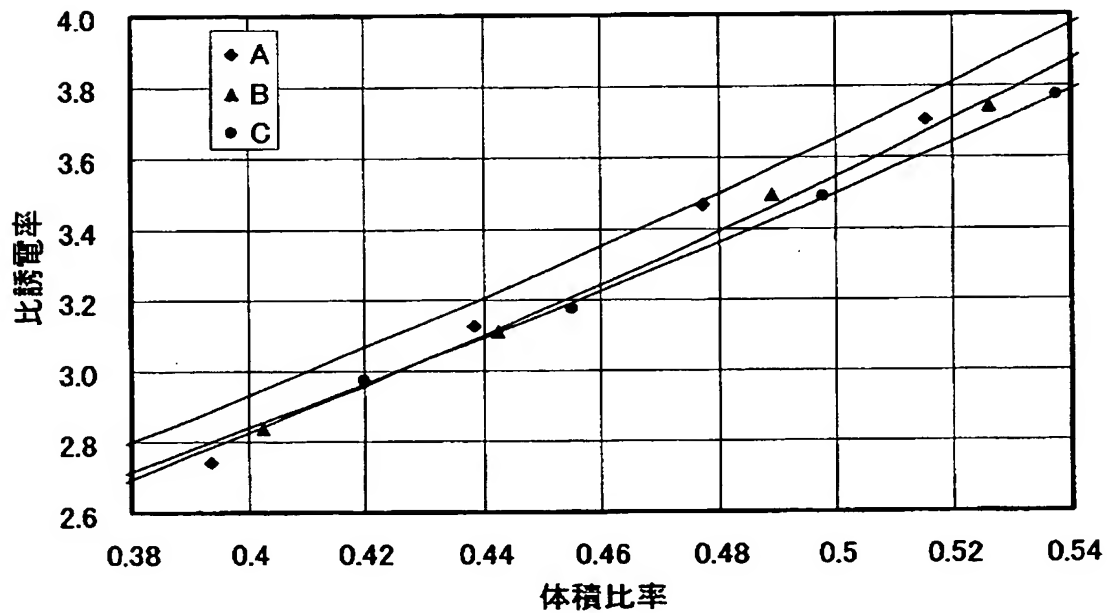
【図 7】

リヒトネッカーロータの式



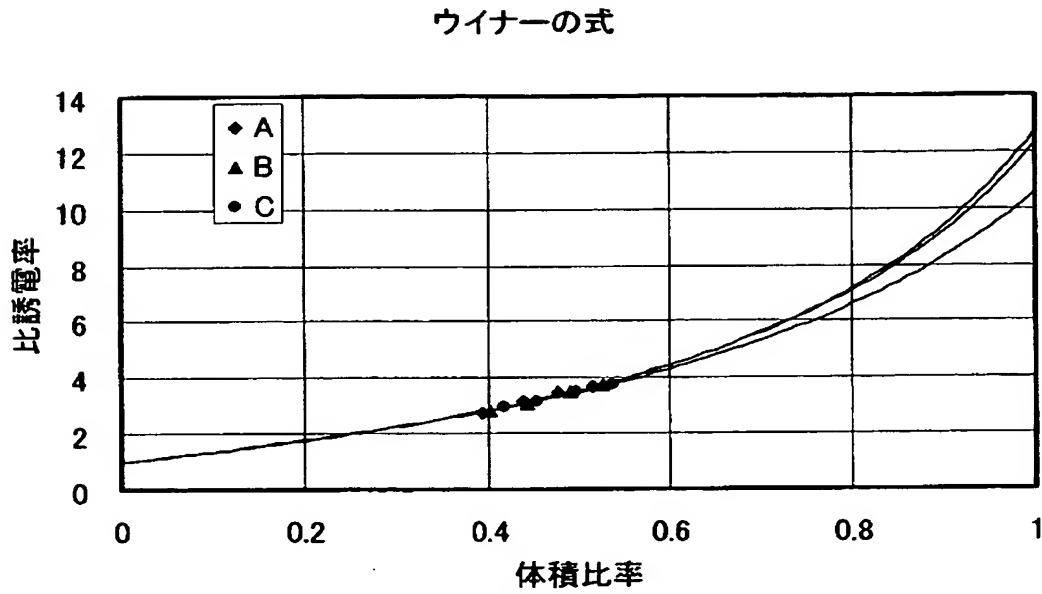
【図 8】

リヒトネッカーロータの式

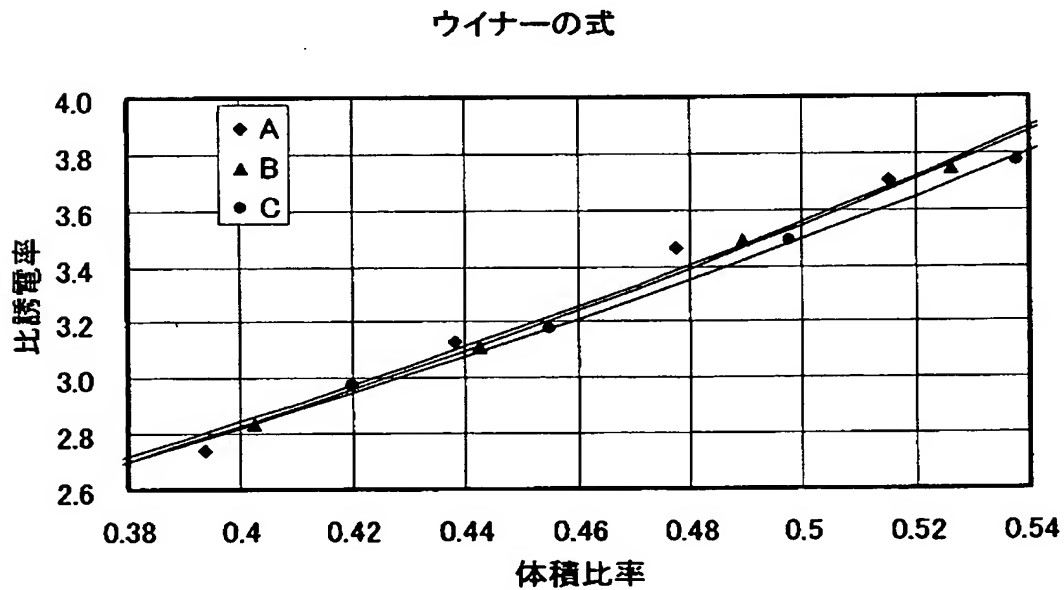


BEST AVAILABLE COPY

【図 9】

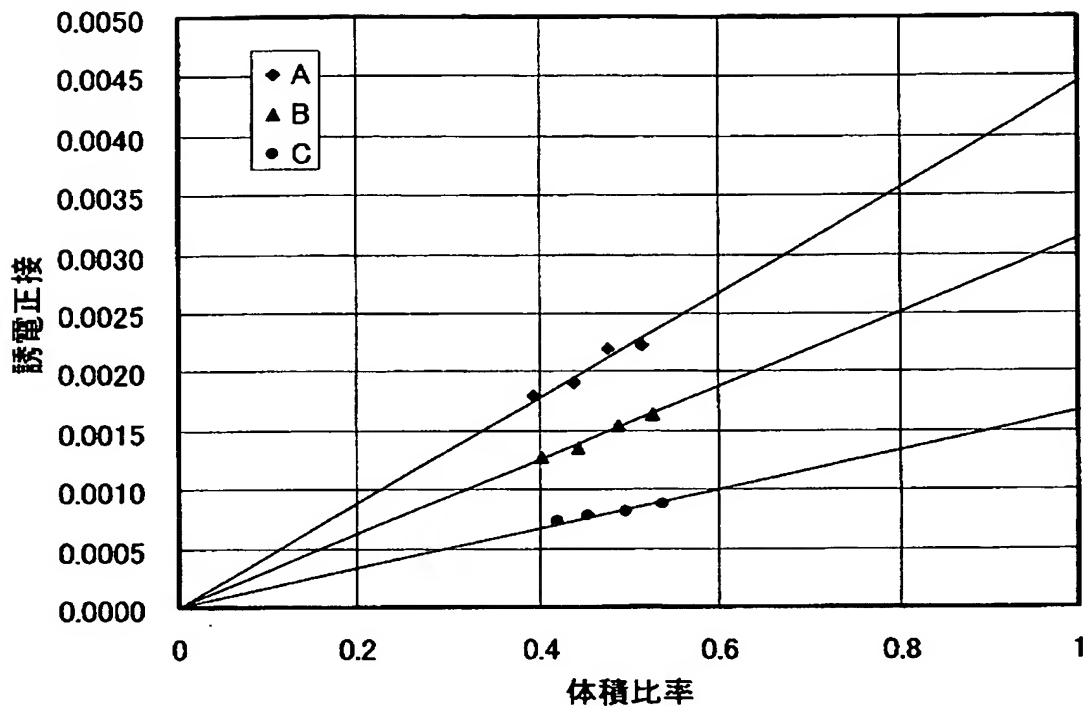


【図 10】

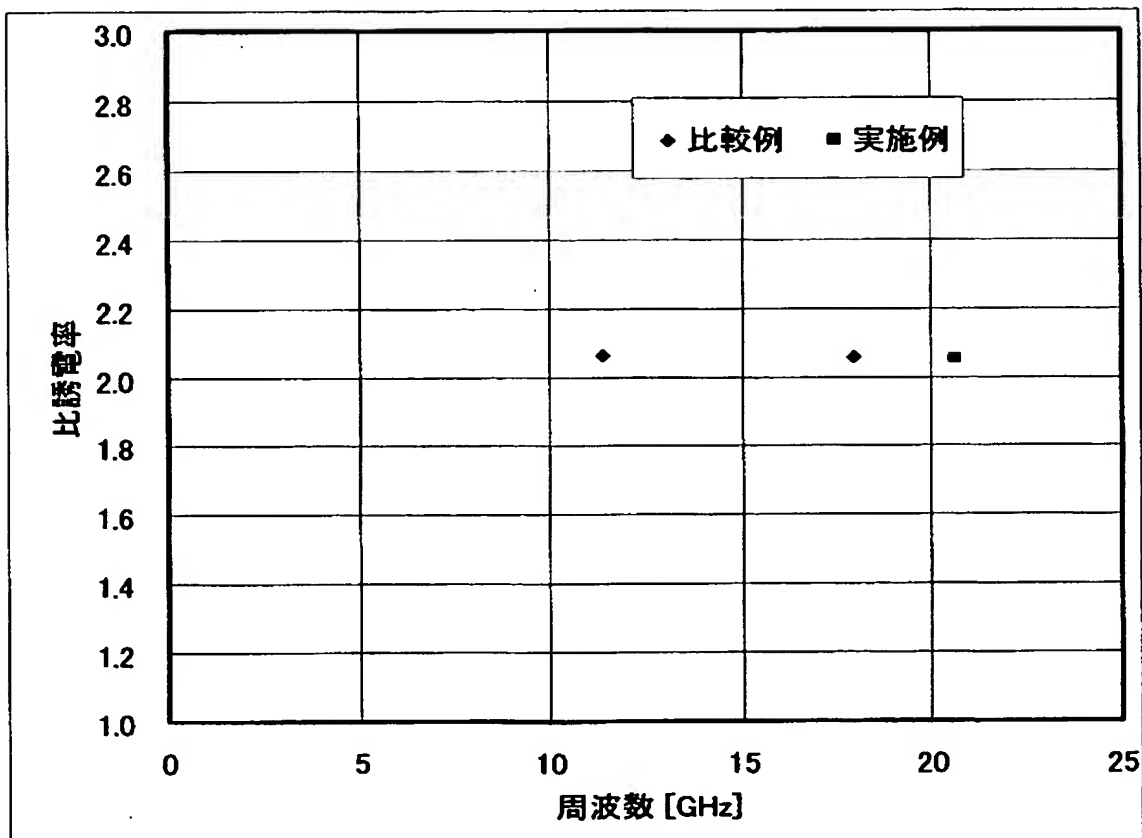


BEST AVAILABLE COPY

【図 1 1】

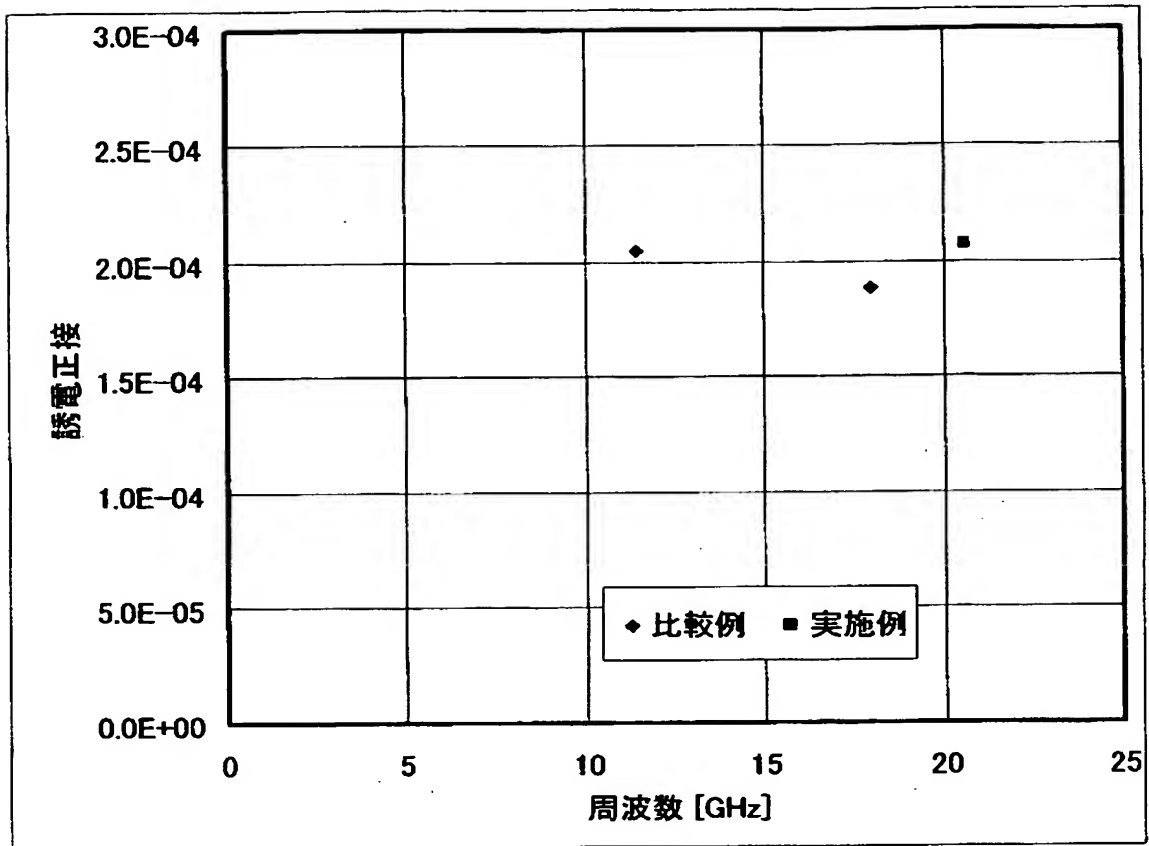


【図 1 2】





【図 13】



**【書類名】 要約書****【要約】**

**【課題】** 誘電体の複素誘電率を高い精度で測定することができる誘電体の複素誘電率の測定装置を提供することである。

**【解決手段】** 誘電体および気体が封入された共振器 4 に、電磁波を入力し、電磁波の入力に応答して、共振器 4 から出力された電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅をネットワークアナライザ 6 で測定し、測定された共振周波数、挿入損失および電力半値幅から誘電体の複素誘電率を算出する。

**【選択図】** 図 1

## 認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2 0 0 3 - 2 8 3 5 9 3
受付番号	5 0 3 0 1 2 7 0 8 9 4
書類名	特許願
担当官	鎌田 柁規 8 0 4 5
作成日	平成 1 5 年 8 月 4 日

## &lt;認定情報・付加情報&gt;

## 【特許出願人】

## 【識別番号】

000003067

## 【住所又は居所】

東京都中央区日本橋 1 丁目 1 3 番 1 号

## 【氏名又は名称】

T D K 株式会社

## 【代理人】

申請人

## 【識別番号】

100078031

## 【住所又は居所】

東京都千代田区神田淡路町 1 - 4 - 1 友泉淡路町ビル 8 階 大石国際特許事務所

## 【氏名又は名称】

大石 皓一

## 【選任した代理人】

## 【識別番号】

100121681

## 【住所又は居所】

東京都千代田区神田淡路町 1 丁目 4 番 1 号 友泉淡路町ビル 8 階 大石国際特許事務所

## 【氏名又は名称】

緒方 和文

## 【選任した代理人】

## 【識別番号】

100126468

## 【住所又は居所】

東京都千代田区神田淡路町 1 丁目 4 番 1 号 友泉淡路町ビル 8 階 大石国際特許事務所

## 【氏名又は名称】

田久保 泰夫

特願 2 0 0 3 - 2 8 3 5 9 3

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 0 0 0 0 0 3 0 6 7 ]

1. 変更年月日	2 0 0 3 年 6 月 2 7 日
[変更理由]	名称変更
住 所	東京都中央区日本橋 1 丁目 1 3 番 1 号
氏 名	T D K 株式会社